

# **СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА СТАЛИ 20 МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ**

*Достовалов Р.А., Лосинская А.А.*

*Руководитель – доцент, к.т.н. Плотникова Н.В.*

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, ruslan.dostovalov@mail.ru

Одним из перспективных направлений применения высокомоощных ускорителей электронов являются технологии наплавки. Современные исследования по наплавке упрочняющих порошков на конструкционные металлы с применением релятивистских электронов показали ряд преимуществ данной технологии [1-3]. Следует отметить, что общее время пребывания формируемого покрытия при высокой температуре незначительно вследствие высокой мощности и большой проникающей способности электронного пучка [1]. Благодаря этой особенности электронно-лучевой обработки становится возможным наплавка порошков с различным химическим составом на подложки, изготовленные из различных сплавов. В данной работе представлен анализ экспериментальных исследований высокоуглеродистых слоёв, сформированных на поверхности пластин из низкоуглеродистой стали методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки.

В качестве материала основы использовались пластины, изготовленные из стали 20 с габаритными размерами 100x50x10 мм. Состав модифицирующего компонента: С – 25 %, Fe – 25 %, MgF<sub>2</sub> – 50 % по массе. Насыпная плотность порошковой смеси, обусловленная глубиной проплавления порошка и основного металла, составляла 0,2 г/см<sup>2</sup>. Облучение образцов проводилось на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6М Института Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН. При облучении образец перемещался относительно неподвижного пучка со скоростью 10 мм/с. Энергия электронов в пучке составляла 1,4 МэВ. Частота поперечного сканирования пучка составляла 50 Гц. В качестве варьируемого параметра выступал ток пучка. В проведенных экспериментах он составлял 20 мА, 22 мА, 24 мА и 26 мА.

При реализации отмеченных режимов были получены ровные наплавленные поверхности при малых потерях наплавочного материала (потери масс составляли 1,7-2,0 %). При указанных параметрах облучения удельная поверхностная энергия процесса  $E$ , кДж/см<sup>2</sup>, может быть оценена по аналогии с электродуговой наплавкой [2] с учетом ширины сканирования пучка:

$$E = \frac{I \cdot U}{V \cdot l}, \text{ где} \quad (1)$$

$I$  – ток пучка, мА,

$U$  – энергия электронов в пучке, МэВ,

$V$  – скорость перемещения образца, см/с,

$l$  – ширина сканирования пучка, см.

Таким образом, удельные энергии при рассматриваемых режимах составляли 5,6; 6,16; 6,72; 7,28 кДж/см<sup>2</sup> соответственно.

Толщина наплавленных слоев составляла не менее 1,6 мм при токах 22-26 мА и не менее 1,1 мм – при токе 20 мА.

Несмотря на высокие скорости наплавки, микроструктуры высокоуглеродистых слоев могут быть проанализированы в соответствии с равновесной фазовой диаграммой «железо-цементит». Так при токе пучка 26 мА в наплавленном слое была получена заэвтектоидная структура (перлит + вторичный цементит), при токах 20, 22 и 24 мА – доэвтектическая (ледебурит + цементит вторичный + перлит).

В ходе экспериментальных исследований не обнаружено значительного градиента по фазовому составу и распределению микротвердости в пределах наплавленного слоя, что свидетельствует о равномерном перемешивании компонентов в расплавленной ванне. Одним из проявлений высокой скорости охлаждения наплавленного слоя являлся видманштеттовый характер выделений вторичного цементита. Макроскопические дефекты были обнаружены лишь по краям пластин – в виде отдельных газовых пор (шифр 2011 по ГОСТ 30242-97).

Средняя твердость полученных покрытий составляла 4,5 ГПа для материалов, полученных при силе тока 26 мА, 5,5 ГПа при силе тока 20 – 24 мА, твердость материала основы составляла 2 ГПа. Испытание на абразивное изнашивание при трении о жестко закрепленные частицы абразива (ГОСТ 17367-71) показало вполне ожидаемое увеличение износостойкости доэвтектических структур по сравнению с заэвтектоидной на 16-18 %.

В пределах настоящей работы исследовалась также возможность получения высокоуглеродистого наплавленного слоя в закаленном состоянии за один технологический этап вневакуумной электронно-лучевой обработки. Очевидно, что уменьшение объема расплавленного металла и/или увеличение площади отвода тепла приведет к увеличению скорости охлаждения наплавленного слоя. В связи с этим были проведены два эксперимента – использовался тот же состав модифицирующего порошка и та же плотность насыпки, что и в предыдущих экспериментах, но при этом наплавка осуществлялась в "дорожечном" режиме (т.е. без использования поперечного сканирования) при токах пучка 4 мА и 6 мА. Удельные энергии в соответствии с формулой (1) составляли 5,1 кДж/см<sup>2</sup> и 7,6 кДж/см<sup>2</sup> соответственно. Таким образом, режим обработки с силой тока

20 мА при сканировании пучка был близок по удельной энергии к "дорожному" режиму 4 мА, а режим сканирования 26 мА – к "дорожному" 6 мА.

Образцы, полученные в "дорожном" режиме с силой тока 4 мА имели доэвтектическую структуру, состоящую из ледебурита, перлита, мартенсита и остаточного аустенита. В случае "дорожного режима" с силой тока 6 мА наплавленный слой имел структуру мартенсита, остаточного аустенита и лишь отдельных островков перлита. Средняя твердость обоих образцов, полученных в "дорожном" режиме составляла 8 ГПа. Глубина проплавленной зоны составляла 1 мм – при режиме 4 мА и 1,4 мм – при режиме 6 мА.

Износостойкость (ГОСТ 17367-71) образца, полученного в "дорожном" режиме с силой тока 6 мА, увеличена на 31% по сравнению с образцом, полученным при использовании поперечного сканирования с силой тока 26 мА. Напротив, износостойкость образца, полученного в "дорожном" режиме при силе тока пучка 4 мА практически не отличается от износостойкости образца, полученного в режиме поперечного сканирования с силой тока 20 мА. Увеличение износостойкости объясняется высокой твердостью мартенсита и распадом аустенита до мартенсита в процессе трения. Данный вывод согласуется с результатами работы [3]. Наличие мартенситной и аустенитной фазы в наплавке режима 4 мА, вероятно, было недостаточно велико, чтобы оказать существенное влияние на уровень износа. Стоит отметить, что наплавленный слой "дорожного" режима с силой тока 6 мА показывает лучшую износостойкость, чем образцы, полученные традиционным методом печной цементации в твердом карбюризаторе с последующей закалкой.

#### Библиографический список

1. Голковский, М. Г. Расчет температурных полей и формирование структуры и свойств поверхностных слоёв металлов и сплавов при облучении пучком релятивистских электронов : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07, 05.16.01 / Михаил Гедалиевич Голковский ; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. – Томск, 2006. – 277 л.

2. Электронно-лучевая наплавка износостойких и коррозионно-стойких покрытий на низкоуглеродистую сталь / И. М. Полетика [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 2. – С. 86-89.

3. Радченко, М. В. Исследование структуры и механических свойств электронно-лучевой наплавки / М. В. Радченко, Е. Н. Косоногов, В. В. Лейман, А. В. Анисимов // Тез. докл. I Всес. Конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц» Часть III. – Томск, 1988. – С. 6-8.